

2

Pilhas de lixiviação

2.1.

Introdução

Além da existência local de grandes depósitos de minérios, a escolha da técnica de pilhas de lixiviação para extração de minerais é influenciada por fatores como a topografia do terreno, evitando-se áreas montanhosas, e a hidrologia do local. De maneira a tornar o processo efetivo e econômico, a manutenção de determinada concentração da solução ácida é necessária, a qual pode ser afetada pelas condições hidrológicas da região. Em climas áridos, com altas taxas de evaporação, uma grande quantidade adicional de água pode ser requerida para manter o volume necessário de água no circuito de lixiviação. Em contrapartida, em climas úmidos, a água infiltrada por chuvas pode resultar em quantidades crescentes de água no circuito, diminuindo a concentração da solução e comprometendo todo o processo industrial.

2.2.

Componentes de uma pilha de lixiviação

Um diagrama esquemático do processamento de minérios de cobre por pilhas de lixiviação é apresentado na figura 2.1. Alguns dos componentes desta técnica é brevemente descrito a seguir:

2.2.1.

Fonte de minério

O material a ser processado pode ser proveniente de diversas fontes tais como minério recém lavado, minério previamente estocado, resíduos de tratamentos convencionais, etc. A maioria das aplicações envolvendo pilhas de lixiviação é feita com minério recém lavado, resultando em um tratamento

econômico para processamento de grandes volumes de minérios com baixo teor de metais.

2.2.2. Preparação do minério

O objetivo principal da preparação do minério é produzir fragmentos suficientemente pequenos para permitir o contato da solução com os metais, mas ao mesmo tempo garantido uma permeabilidade adequada ao fluxo através de toda a pilha. O pré-tratamento do minério pode ser em alguns casos dispensável (lixiviação direta do material extraído na mina em blocos de até 120cm de diâmetro – *run-of-mine ore*), enquanto que em outros pode exigir operações de britagem e/ou aglomeração. O coeficiente de permeabilidade em minérios com alta porcentagem de finos pode tornar-se muito baixo, resultando em longos intervalos de tempo para o tratamento e baixas quantidades de metal produzido. No caso de metais preciosos (ouro e prata) a técnica de aglomeração procura formar, pela adição de ligantes, um material denso, poroso e estável quando manuseado, empilhado e percolado pela solução de lixiviação. O procedimento é similar ao tratamento de solos pela adição de cimento ou cal, sendo mais comum para o caso de aglomeração de minérios com alta porcentagem de finos o emprego de cimento Portland (McClelland e van Zyl, 1988).

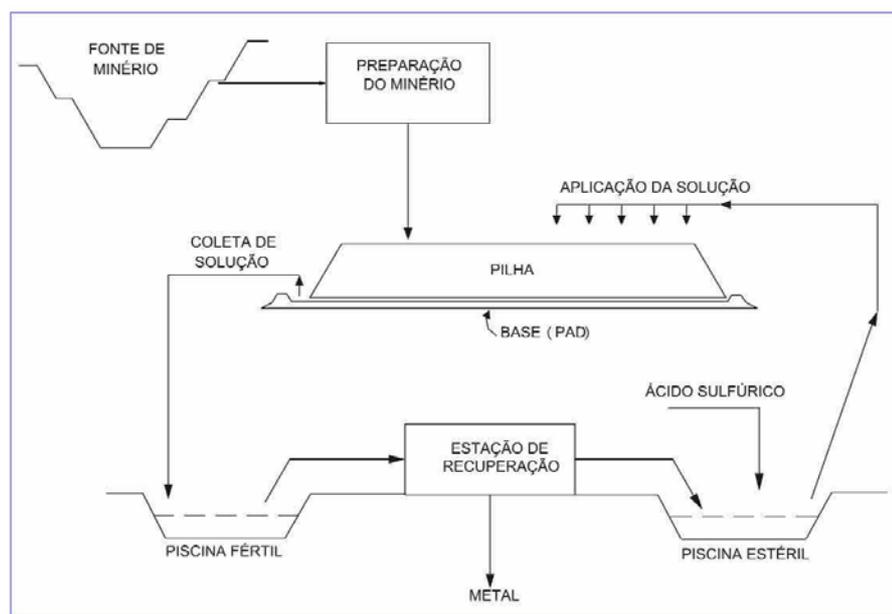


Figura 2.1 – Esquema do processo de uma pilha de lixiviação (Dorey, Zyl e Kiel, 1988).

2.2.3.

Pilha e base (*pad*)

Cada pilha de lixiviação é única e o projeto da pilha e sua base (*pad*) requer a consideração de vários fatores como tipo de minério, conveniência da utilização de processo de lixiviação, topografia do terreno, propriedades geotécnicas e hidrológicas da área escolhida para a sua construção.

A pilha deve formar uma estrutura estável sob carregamento estático (peso próprio) ou dinâmico, se projetada em local de alta sismicidade, e sua fundação deve ser capaz de suportar os carregamentos aplicados, não apenas em relação à capacidade de carga mas também em termos da possibilidade de ocorrência de recalques diferenciais que podem afetar o sistema de drenagem, revestimentos e sua base. Ensaios geotécnicos de campo e/ou laboratório devem ser realizados para determinar as características de resistência e de deformabilidade do material da fundação.

Revestimentos impermeáveis são necessários para conter a solução ácida dentro dos limites da instalação da pilha, prevenindo a possibilidade de vazamentos e contaminação do meio ambiente.

Três métodos básicos para construção de pilhas são utilizados: a) pilha com base re-utilizável (figura 2.2) sobre a qual o minério é carregado, lixiviado, lavado e neutralizado, se necessário, e em seguida disposto em uma pilha de minérios já processados; b) pilha com base expansível (figura 2.3) onde, após a lixiviação, o minério é mantido no mesmo local, possibilitando subseqüentes ciclos de lixiviação para recuperação de quantidades residuais de metal, antes de ser lavado, neutralizado (se necessário) e finalmente reconstituído; c) pilha de lixiviação em vale (figura 2.4) que envolve a deposição do minério atrás de uma estrutura de contenção, com a lixiviação acontecendo através de subseqüentes camadas do material, possibilitando que a maior parte do minério permaneça em contato com a solução ácida durante toda a operação. A capacidade de armazenamento dos vazios do minério é freqüentemente usada para conter a solução fértil, reduzindo ou mesmo eliminando a necessidade de construção de uma piscina para esta finalidade. Uma discussão detalhada das principais vantagens de cada método de

construção pode ser encontrada, pelo leitor interessado, em Dorey, van Zyl e Kiel (1988) e Muhtadi (1988).

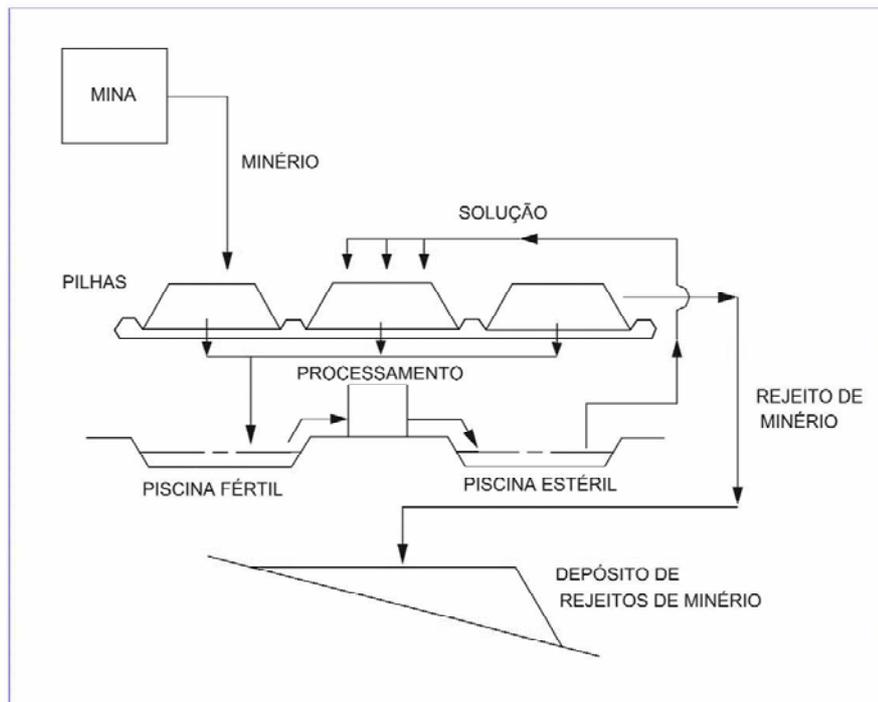


Figura 2.2 – Pilha com base re-utilizável (Dorey, Zyl e Kiel, 1988).

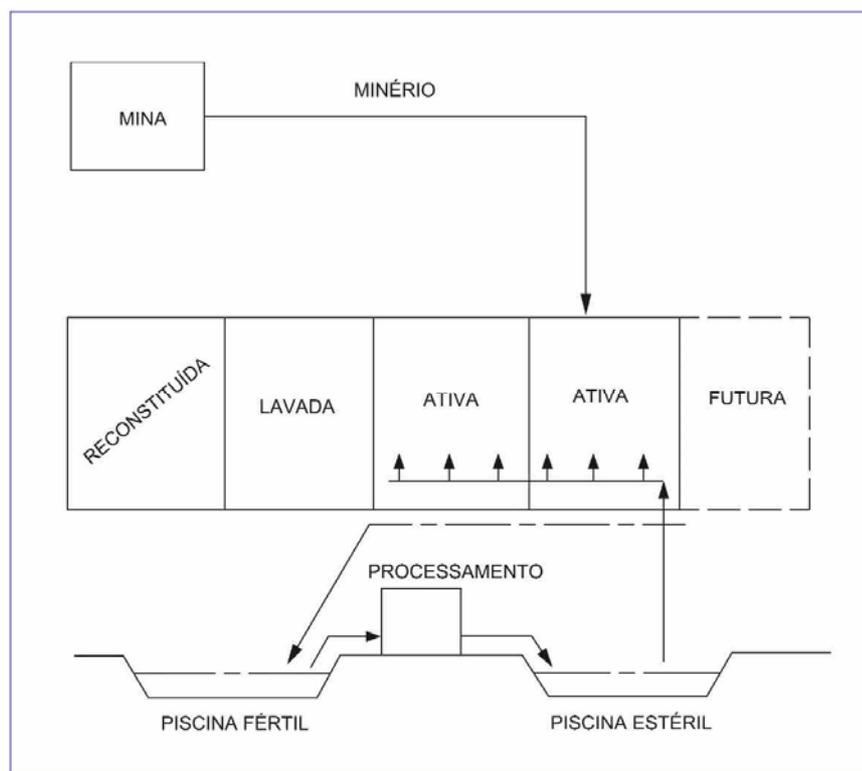


Figura 2.3 – Pilha com base expansível (Dorey, Zyl e Kiel, 1988).

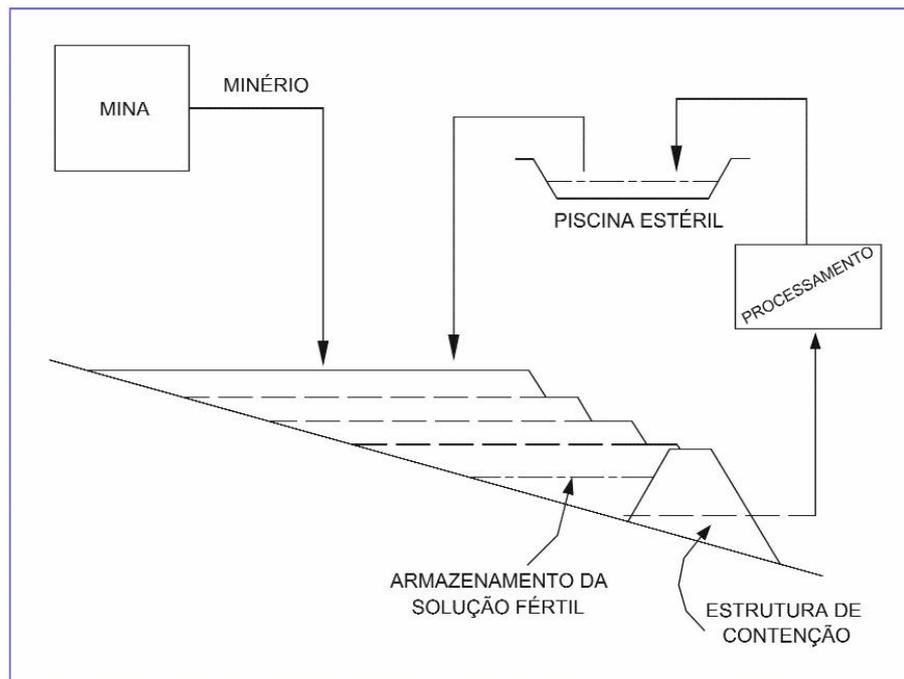


Figura 2.4 – Pilha de lixiviação em vale (Dorey, Zyl e Kiel, 1988).

2.2.4. Aplicação da solução / sistema de coleta

A solução de lixiviação (à base de ácido sulfúrico em mineração de cobre) é transportada da piscina estéril (*barren pond*) para a pilha através de um sistema de tubulações. Um conjunto de bombas é também necessário para fornecer pressão suficiente aos irrigadores (*sprinklers*). Um requerimento básico da operação é que a distribuição da solução seja uniforme no topo da pilha, e vazões típicas de aplicação garantam condições de fluxo 1-D não saturado ao longo da altura da pilha. A reação química na qual os metais são dissolvidos exige a presença de oxigênio e, portanto, a condição não-saturada do fluxo é essencial para o processo de lixiviação. Geralmente, a vazão por metro quadrado de área está entre 1×10^{-4} cm/s a 5×10^{-4} cm/s, suficiente para conservar o minério de cobre úmido e não-saturado. De acordo com Thiel e Smith (2003) o coeficiente de permeabilidade do minério saturado deve ser ao menos 10 vezes maior do que a vazão de aplicação da solução ácida para garantir condições de não saturação na pilha.

Uma camada de material permeável é geralmente colocada diretamente sobre o revestimento impermeável antes da construção da pilha. O propósito desta

camada é possibilitar tanto a drenagem da solução quanto atuar como elemento de proteção do revestimento durante a construção da pilha.

A solução fértil (*pregnant solution*) é coletada da pilha através de um sistema de drenagem constituído por tubos perfurados, colocados no interior da camada permeável sobre a base (*pad*) da pilha. Estes tubos ajudam a diminuir os valores de carga de pressão sobre a base da pilha e são por sua vez conectados a um sistema de coleta que recolhe o fluido para a piscina de solução fértil.

2.2.5. Piscinas de solução fértil e estéril

A solução fértil (*pregnant solution*) contém os minerais dissolvidos e, portanto, é economicamente imperativo que nenhum tipo de vazamento ocorra através da piscina. Um revestimento impermeável é utilizado para conter a solução fértil bem como para evitar possíveis impactos ambientais causados por sua liberação.

A solução estéril (*barren solution*) contém a solução de lixiviação após o processo de remoção do metal na estação de recuperação. Por razões econômicas e ambientais, a piscina da solução estéril deve ser igualmente contida por revestimento impermeável. Antes de re-aplicação da solução para um novo ciclo de lixiviação, a concentração da mesma é corrigida na piscina.

É comum que ambas as piscinas sejam construídas adjacentes, confinando os grandes volumes de solução em uma área específica, minimizando custos de construção e operacionais.

2.3. Aspectos Geotécnicos

Em geral, uma investigação das propriedades geotécnicas do local escolhido para construção da pilha (figura 2.5) procura reunir as seguintes informações: a) condições do solo de fundação da pilha e das piscinas de contenção (*ponds*), submetido a uma grande variação das condições iniciais de tensão; b) condições das escavações, ou quão facilmente materiais podem ser retirados de áreas onde cortes são previstos para construção da base da pilha; c) qualidade e quantidade de materiais de construção potencialmente disponíveis para revestimentos, camadas

O projeto da base da pilha deve também levar em conta a inclinação do terreno (figura 2.6), tal que pela ação da gravidade a solução seja drenada para os pontos topograficamente mais baixos e então recolhida para a piscina de solução fértil. Se a região escolhida para a construção da pilha for muito plana ou íngreme, trabalhos de corte e escavação devem ser executados para atingir uma inclinação adequada do terreno (tipicamente menor do que 5%, preferencialmente em torno de 2%). Alternativamente, em caso de taludes muito acentuados, pode ser utilizada a técnica de pilha em vale (figura 2.4).

A seleção do tipo de revestimento depende da legislação ambiental (revestimentos duplos, sintéticos, etc) e simultaneamente com sua definição deve ser feita uma avaliação do material localmente disponível para ser utilizado como proteção do revestimento e drenagem da pilha.

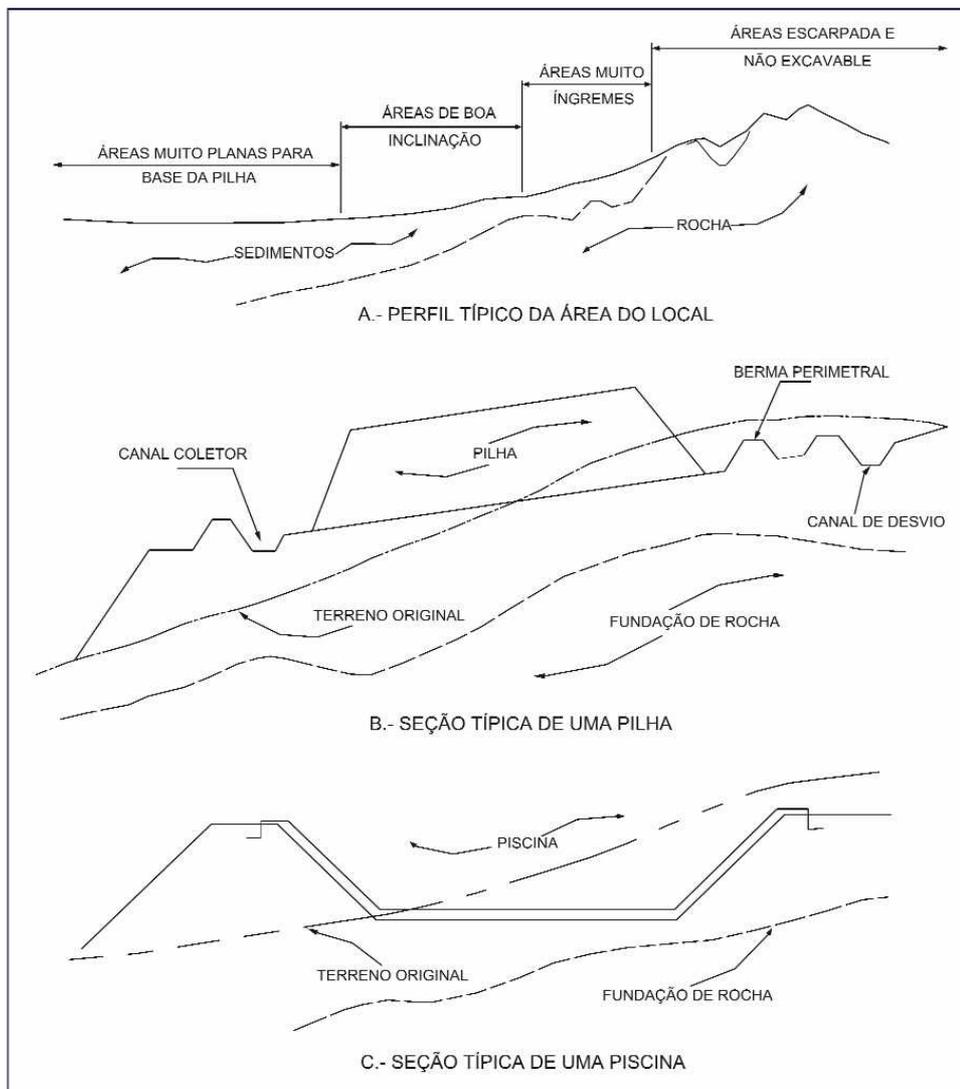


Figura 2.6 – Aspectos gerais do local de construção da pilha ((Strachan e Dorey, 1988)

2.3.2. **Piscinas de solução fértil e estéril (*ponds*)**

Devido ao valor econômico da solução armazenada nas piscinas, o revestimento das mesmas deve ser feito com material de menor permeabilidade possível, freqüentemente sintético. Em muitas instalações, é adotada ainda a técnica de duplo revestimento, com material drenante e sistema de coleta instalado entre ambos, permitindo que vazamentos através do revestimento superior possam ser detectados. O revestimento deve ser resistente à luz do sol, variações de temperatura, pressão do vento e deve suportar, sem dano, o fluxo da solução proveniente do sistema de coleta (tubos ou canais). Adicionalmente, as piscinas devem ser projetadas para armazenar além da solução de lixiviação a água proveniente de chuvas.

Piscinas com revestimento sintético em solo compactado apresentam geralmente inclinação 2,5:1 ou 3:1. Para instalações de pequeno porte, tanques também tem sido usados para armazenamento da solução.

2.3.3. **Sistema de coleta**

O sistema de coleção consiste em uma série de componentes destinados a captar a solução na pilha e transportá-la, por gravidade, à piscina de solução fértil. O sistema de coleta no interior da pilha também auxilia na redução da zona de saturação acima do revestimento. O sistema de coleta é projetado para acomodar à vazão da solução ácida bem como o fluxo gerado por percolação, através da pilha, da água de chuvas.

Tipicamente, o sistema de coleta é constituído por uma zona de drenagem acima do revestimento, formada pelo próprio minério se suficientemente permeável, material para filtro (pedregulho) e tubos de drenagem. Regras práticas para seleção destes materiais podem ser obtidas, por exemplo, em Welsh (1987).

O projeto do sistema de coleta no interior da pilha é baseado na inclinação da sua base, a permeabilidade do minério e a vazão de aplicação da solução ácida no topo da pilha. Se o minério for bastante permeável, pode ser considerado adequado como único elemento de drenagem; se for considerado de baixa

permeabilidade, tendo em vista a vazão aplicada, a zona de saturação acima do revestimento da base deve ser reduzida instalando-se um sistema de tubos de drenagem (figura 2.7).

O sistema de coleta deve ser projetado para manter as zonas de saturação acima do revestimento em níveis tão baixos quanto possível. Além disso, deve também funcionar como filtro, prevenindo que as partículas menores de minério sejam transportadas para as piscinas. Devem também ser quimicamente compatíveis com a solução transportada, para minimizar a possibilidade da ocorrência de fissuras, desgastes, etc.

Na figura 2.7 também aparece a zona de saturação entre drenos paralelos cuja posição pode ser aproximadamente determinada com base na teoria de fluxo vertical 1D não-confinado. Outras soluções mais apropriadas para representação do fluxo 2D entre drenos, baseadas no método das diferenças finitas (Duke, 1973) ou no método dos elementos finitos (East et al., 1987) podem também ser obtidas.

Com base nos níveis de saturação assim determinados, o engenheiro deve julgar a posição da linha freática é aceitável ou, caso contrário, utilizar material de drenagem ou tubos menos espaçados a fim de reduzir a altura da zona saturada para valores aceitáveis.

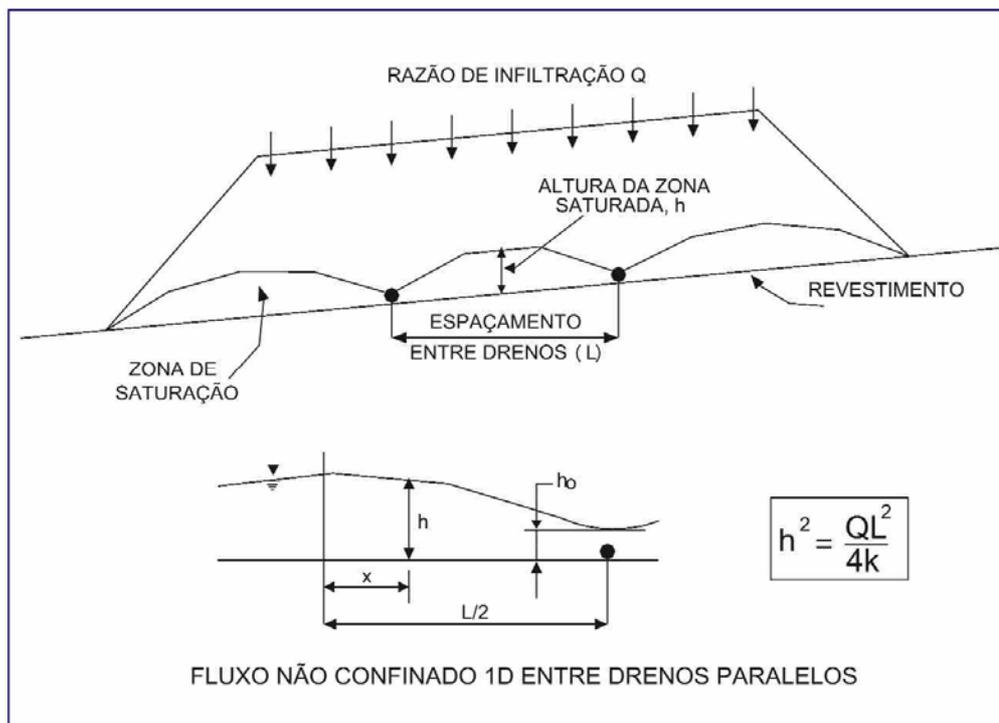


Figura 2.7 – Aspectos gerais do sistema de coleta (Strachan e Dorey, 1988)

2.3.4.

Pilha

A pilha deve ser projetada tão permeável quanto possível, com características de fluxo homogêneo para permitir um fluxo rápido através do minério e sua coleta no sistema de drenagem da base. Deve também permitir o contato da solução com o máximo do minério possível e maximizar a quantidade de oxigênio nos vazios da pilha.

Uma ou mais camadas são usadas na construção da pilha, com a altura total da pilha dependendo das condições da fundação, da resistência da base e de seu revestimento, da topografia do terreno, como também das propriedades mecânicas do minério e do tipo de equipamento utilizado na construção.

As alternativas de construção da pilha incluem transporte do material através de esteiras, descarregamento por caminhão e espalhamento por motoniveladoras, etc. (Muhtadi, 1988). O tráfego de equipamentos pode fragmentar e compactar o minério, criando uma região superficial de baixa permeabilidade. Ao final da construção, esta zona deve ser escarificada e providências devem ser tomadas para minimizar o trânsito de equipamentos, quando possível.

2.4.

Estabilidade de taludes

A estabilidade deve ser avaliada em casos onde movimentos ou deslizamentos da pilha possam ocorrer, especialmente nas situações envolvendo fundação pouco resistente, pilhas de grande altura, terrenos muito inclinados, desenvolvimento de zonas de saturação acima do revestimento da base, possível ocorrência de movimentos sísmicos, etc. A análise de estabilidade auxilia o engenheiro em decidir se as dimensões da pilha são adequadas ou se a base da pilha e o sistema de coleta são aceitáveis.

A avaliação da estabilidade da pilha é geralmente feita através de uma análise 2D, considerando-se uma seção transversal representativa e o cálculo do fator de segurança, ao longo de potenciais superfícies de ruptura (figura 2.8), através de um método de equilíbrio limite, geralmente o método das fatias

(método de Bishop Simplificado, 1955; método de Janbu Simplificado, 1968; método de Morgenstern & Price, 1965; método de Sarma, 1973, 1979; entre outros). O cálculo do fator de segurança é geralmente feito através de microcomputadores que geram aleatoriamente as potenciais superfícies de ruptura. Alguns métodos simplificados (método das cunhas) podem também ser empregados manualmente para análise da estabilidade de pilhas (Caldwell e Moss, 1985).

Potenciais superfícies de ruptura (figura 2.8) devem considerar as seguintes situações: a) superfícies através do minério somente; b) superfícies através da fundação e/ou dique de contenção; c) superfície compreendendo trecho do revestimento; d) superfícies ao longo da totalidade, ou da maior parte, do revestimento.

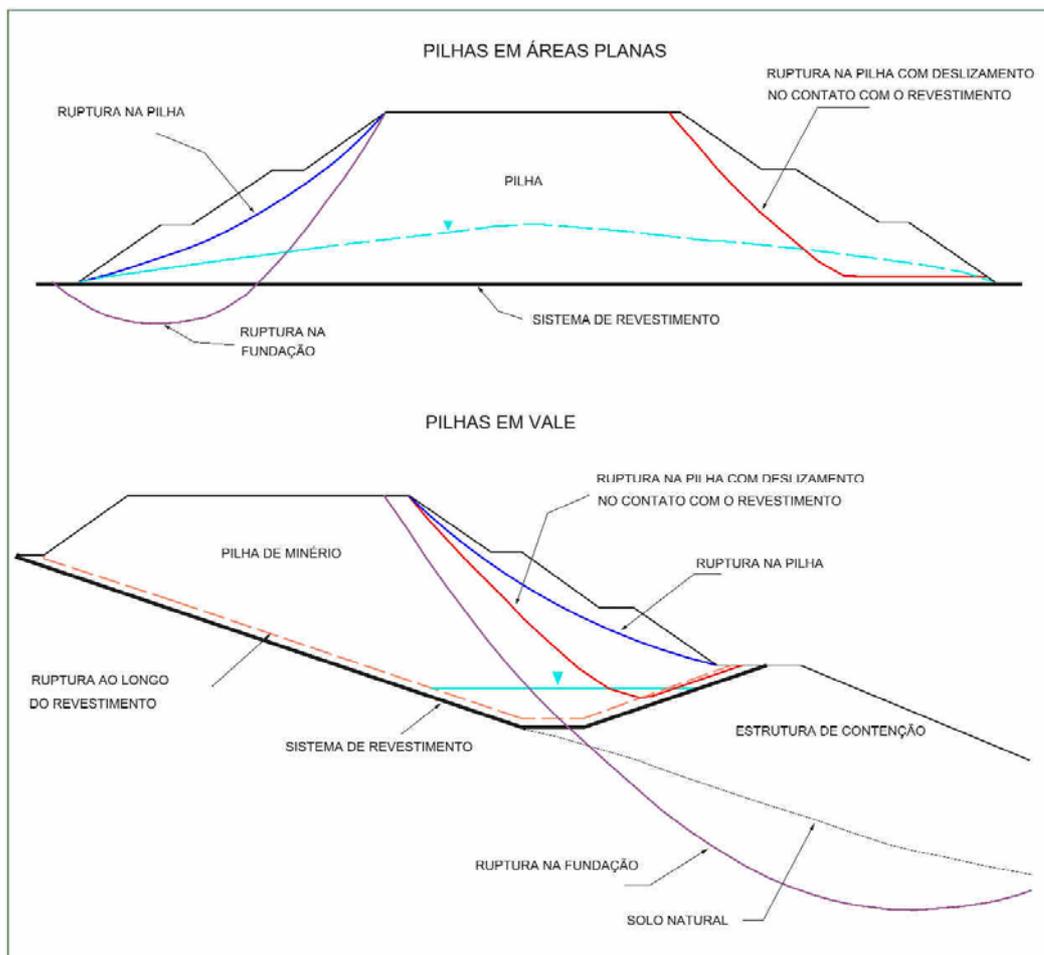


Figura 2.8 – Potenciais superfícies de ruptura na pilha (Harper; Leach, Tape - 1987)

Estabilidade estrutural da pilha e integridade hidráulica do revestimento são fatores de mesma importância no projeto de engenharia. Geotêxteis colocados acima do revestimento para protegê-lo de perfurações produzidas pelo minério ou equipamentos pode reduzir o ângulo de atrito neste contato, diminuindo a estabilidade da pilha em consequência. Este conflito é resolvido usando-se uma fina camada de areia entre ambos os materiais.

Recomendações técnicas (U.S. Army Corps of Engineers, 1982; Wilson e Marsal, 1979) sugerem o fator de segurança estático mínimo para barragens de terra entre 1,3 e 1,5, valores também geralmente utilizados para pilhas de lixiviação sob carregamentos estáticos, adotando-se o fator mínimo de 1,3 no caso em que a solução é armazenada acima do revestimento da base, típico da construção de pilhas em vale.

Considerações a respeito de excitações sísmicas são mais complexas. Geralmente, a estabilidade deve ser sustentada durante e após a ocorrência do terremoto de projeto, cuja magnitude depende do histórico de terremotos registrados ao redor do local de construção da pilha (raio de 100 km), selecionando-se, no caso de localidades remotas e pouco povoadas, a máxima magnitude da excitação já ocorrida em um período de 100 anos. Dois cenários podem dificultar a análise, entretanto: a) risco de liquefação se o material da fundação for constituído por solos granulares saturados ou caso a pilha torne-se localmente saturada pela solução de lixiviação; b) possibilidade de movimento em falhas geológicas devido à ocorrência do terremoto. As áreas do mundo onde a lixiviação é mais intensidade aplicada em mineração de metais (norte o Chile e sul do Peru) são também zonas de sismicidade bastante ativa. O deserto de Atacama, no Chile, foi a região onde o maior terremoto já foi registrado, atingindo a magnitude 9,5 na escala Richter, em maio de 1960.

Na falta de outras informações, normalmente adotam-se as recomendações de Seed (1979) propôs para análises pseudo-estáticas de barragens de terra: a) coeficiente sísmico horizontal de 0,1g e fator de segurança mínimo de 1,15 para terremotos com magnitude 6,5 ou inferior; b) coeficiente sísmico horizontal de 0,15g e fator de segurança mínimo de 1,15 para terremotos com magnitude entre 6,5 e 8,25.

É importante ressaltar que análises de estabilidade a longo-prazo devem também ser consideradas, procurando-se analisar o comportamento da pilha após

seu fechamento e reconstituição ambiental. De acordo com os estudos de Breitenbach (2004) a estabilidade estática crítica da pilha ocorre após logo após a sua construção, com a resistência ao cisalhamento do minério e revestimento (geomembrana, modernamente) tendendo a crescer com o tempo. Outros pesquisadores (Thiel e Smith, 2003) sustentam que não há ainda resultados definitivos sobre a influência a longo prazo da degradação do minério causada pela dissolução do mineral e ação biológica durante o processo de lixiviação.

2.5. Resistência ao cisalhamento

Valores típicos de resistência ao cisalhamento para materiais usados em aplicações da engenharia de minas foram listados por Vick (1983), Holtz e Kovacs (1981) e Leps (1970). De modo geral, o ângulo de atrito geralmente varia entre 30° a 50°, dependendo do tamanho e angulosidade das partículas bem como da estrutura do material granular.

É importante lembrar que para altos níveis de tensão, como os existentes em pilhas de grande altura – 150m – a envoltória de ruptura pode apresentar-se curva, fazendo com que os valores normalmente utilizados do ângulo de atrito, obtido em ensaios realizados sob menor estado de tensão, sejam na realidade não conservativos para o projeto de estruturas de enrocamento de grande altura (Thiel e Smith, 2003).

A resistência ao cisalhamento entre materiais naturais e sintéticos (revestimento) deve ser bastante investigada no caso de pilhas construídas em terrenos de grande inclinação ou pilhas em vale. Em alguns casos, esta resistência pode controlar o projeto da pilha. Valores para materiais típicos foram obtidos por Deatherage et al. (1987), Martin et al. (1984), Saxena e Wong (1984). Uma grande variação destes valores pode ser observada, com o ângulo de atrito na interface cobrindo um intervalo de menos do que 10° a mais do que 30°, dependendo do tipo do material sintético, sua espessura, tamanho e angulosidade do material acima e abaixo do revestimento, etc.

Naturalmente, valores obtidos na literatura deveriam ser considerados apenas informativos, necessitando-se de ensaios especiais para a sua determinação em laboratório (cisalhamento direto ou triaxial), de difícil execução devido à

escala necessária para amostragem e teste de material de enrocamento. Uma estimativa aproximada da resistência do minério pode ser feita em campo observando-se o ângulo de repouso natural dos taludes da pilha.

Ensaio de grande escala executados por Leps (1970), Marachi et al. (1972) e Barton e Kjaernsli (1981) estão apresentados na figura 2.9. Estes resultados mostram a influência das tensões de confinamento, que tendem a decrescer a resistência do enrocamento (ângulo de atrito) com a altura da pilha (tensão vertical). Estes resultados são mais aplicáveis para minérios provou provenientes diretos da mina (*run-of-mine ore*), pouco fragmentados, mostrado que o acréscimo de resistência com o aumento da densidade relativa do material à medida que a pilha é construída pode ser contrabalançado pelo aumento da tensão vertical. Em outras palavras, a pilha construída pelo lançamento de minérios não compactados, umedecida durante a lixiviação e subsequente carregada por camadas sucessivas de material pode ganhar resistência até determinada altura ótima, a partir da qual qualquer carregamento adicional tende a decrescer a resistência da pilha.

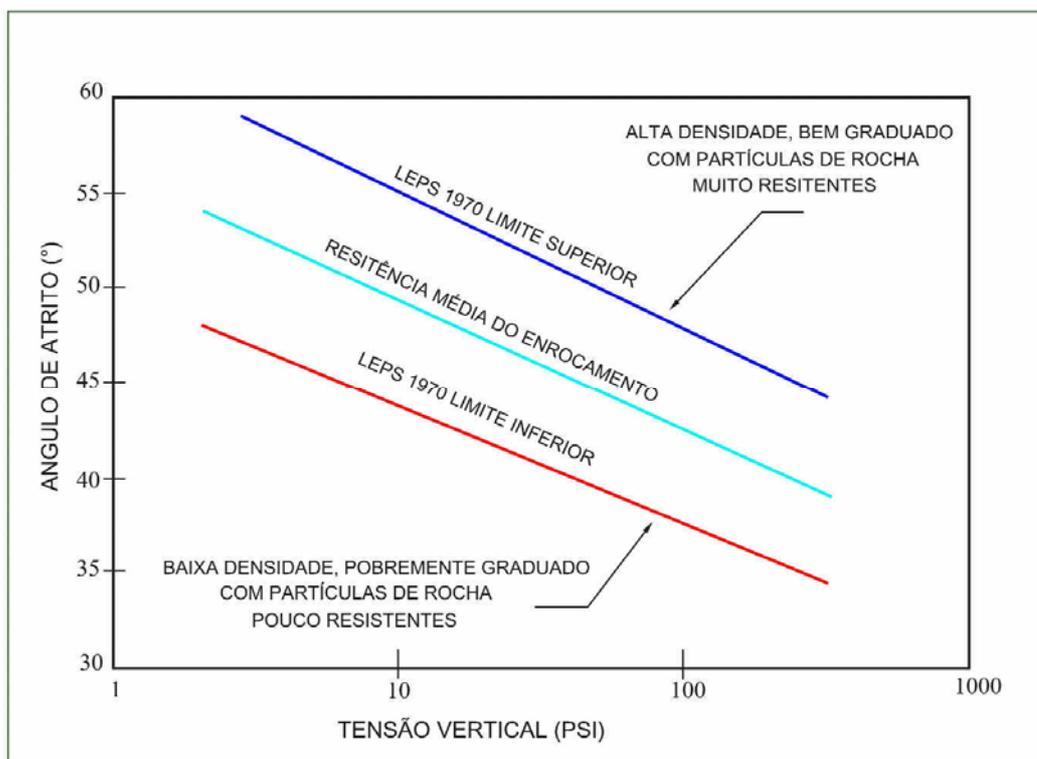


Figura 2.9 – Ângulo de atrito versus tensão vertical (psi) - (Leps, 1970).

De acordo com Breitenbach (1993) a altura ótima da pilha pode ser obtida experimentalmente em ensaios de compressão 1D verificando-se para qual aumento do carregamento (acréscimo de nova camada de minério) a variação do peso específico seco material é mínima.

Antes portanto de atingir a altura ótima, pode-se admitir que a resistência ao cisalhamento aumenta à medida em que novas camadas são adicionadas à pilha. Alguns autores (Smith e Giroud, 2000) consideram que a estabilidade da primeira camada de minério lançada sobre a base, sem compactação, é a mais crítica em termos de estabilidade. Além disso aqueles autores também argumentam que o fator de segurança será maior na construção para montante (*up-gradient slope*) do que para a direção de jusante (*down-gradient slope*) conforme ilustra a figura 2.10.

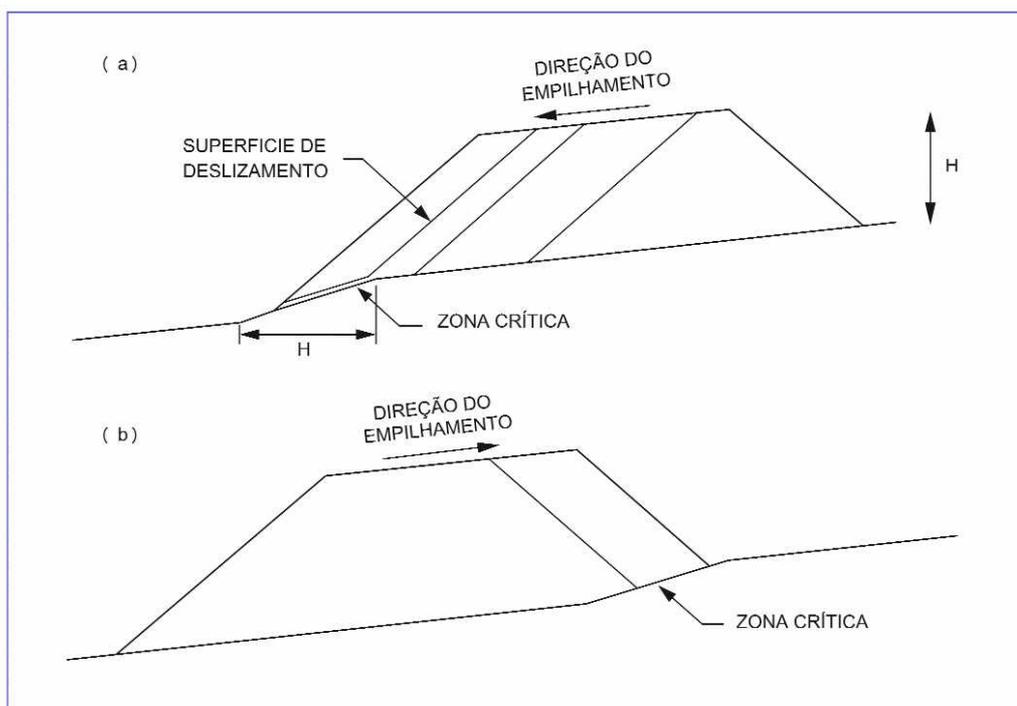


Figura 2.10 – influência da técnica de construção na estabilidade da pilha: a) empilhamento para jusante; b) empilhamento para montante (Smith e Giroud, 2000).